SICHUAN ACADEMY OF SOCIAL SCIENCES

硕士学位论文

题目：试论成组玉石璧具有承担标准律器的功能

——以三星堆遗址（真武仓包包）出土成组玉石璧为例

学位申请人姓名：胡 岩

学　　　　　号：20100056

所　　　　　别：历史所

专　　　　　业：专门史

研　究　方　向：中华文化史

导师姓名及职称：幸晓峰 研究员

完成时间：二〇一三年四月

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年　　月　　日

版权使用授权书

本人完全了解四川省社会科学院研究生学院关于收集、保存和使用学位论文的规定，即：按照学院要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学院有权保存学位论文的印刷本和电子版本，且有权将学位论文的内容授权给有关单位的数据库进行检索。

学位论文作者签名：　　　　　　　　指导教师签名：

年　　月　　日　　　　　　　　年　　月　　日

摘 要

中华古代文明灿烂辉煌，中国古代声学研究成果斐然，而其中尤以“同律度量衡”学说研究意义深远。作为不仅仅是乐律研究的重要课题，同时也是礼乐文明的关键所在，关于此学说的研究涵盖领域广泛，涉及内容庞杂，其中的难点，尤以为理论上的标准器找到现实中的考古依据为最。近些年来各地相继出土的成组玉石璧，为这一研究提供了新的契机。业已知晓成组玉石璧具有一定的音乐性能，那么再深入一步，通过现代化技术手段，结合现代声学原理和古今律学计算方法，能否证明成组玉石璧具有承担标准律器的功能呢？本文将通过以上所述各种方法手段，对这一命题进行论证。

关键字： 成组玉石璧 频率比 三分损益法 律比关系

Abstract

Chinese ancient civilization is glorious and resplendent, Chinese ancient acoustics has many research achievements, and especially in the "law of weights and measures" theory of far-reaching significance. As is not only an important subject of study of temperament, but also the music civilization is the key point, research on this theory covers a wide range of areas, it involves numerous, one of the most difficult, especially for standard theory to find the reality of the archaeological evidence for the research. In recent years, the localities have unearthed jade group, provides a new opportunity for the study. Industry groups have known the jadestone music performance, then go a step further, by the modern technology, combined with modern acoustics principle and calculation method of ancient and modern temperament. Could all this prove the jadestone assume the standard law group has the functions? This will be through the above methods, to prove this proposition.

Key words：The jadestone group　Frequency ratio　Three points profit and loss method　Music relationship

目　录

摘 要 I
Abstract II
第一章　绪 论 1
1、研究背景 1
2、理论框架 3
3、研究方法 5
（1）大小半音法 7
（2）三分损益法 8
（3）模拟验证法 8
第二章　理论基础 10
1、三星堆遗址（真武仓包包）出土成组玉石璧的音乐性能情况 10
2、成组玉石璧的形制特点 11
3、成组玉石璧的音乐声学测量及实验理论 11
4、现代声学中有关于律学的基本知识及理论情况 11
（1）计算方法中频率比值的九分之八的由来 12
（2）计算方法中频率比值的四分之三的由来 14
（3）通过律比值，得出在给定基音条件下计算频率的公式 17
第三章　三星堆成组玉石璧律比分析 22
1、三星堆遗址（真武仓包包）出土玉石璧及复原调音实验制作的成组石璧测量原始结果如下图 22
2、以大小半音法结合三分损益法计算成组玉石璧的音乐测量结果之律比关系 22
（1）全部玉石璧理论与实测音分误差均在绝对值 8 音分间。 23
（2）全部玉石璧在任取 87GSZJ：4 件石璧，假定其为给定基音情况下，理论与实测音分误差同样均在绝对值 10 音分间 24
（3）模拟推算仿制成组玉石璧理论上的音乐测量值结果与实测结果同样符合 24
第四章 结 论 26
参考文献 27
致 谢 31
个人简历 32

第一章　绪 论

1、研究背景

中国文明传承至今，有着五千余年从未间断的深厚文化积淀，有着一脉相承光辉灿烂的古代文化。而三千多年的音乐声学研究，同样源远流长，在浩如烟海的文献史料中，有关乐律方面的典籍更是汗牛充栋。其中的重要成果——“同律度量衡”学说便产生于我国上古时期，它是我国辉煌的古代文明的标志，是我国乐律研究的重要成果，同时也是人类文明史的精华。在绵亘数千年前的历史发展长河中，“同律度量衡”学说从最初的创立、不断发展完善、长期实践修正到最终自成一格，其深刻的文化研究价值、历史研究内涵及科技研究方法，都是我们后辈学人在日新月异的文明发展路途中需要不断认识和深入发掘的，这是因为关于“同律度量衡”学说的更进一步研究，不仅仅具有其单纯乐律方面的价值，更在于关于此学说的研究，对与我们今天重新了解和认识古代乐律学、古代天文学、古代计量学、古代算学等诸多领域具有不可忽视的重要作用，对于我们研究中华礼乐文明的发展具有不可估量的重要意义，正是基于这个原因，在科学技术突飞猛进的今天，结合当前最新的考古发掘和研究成果，同时采取现代化的声学研究方法和技术手段重新审视此一学说，深入挖掘其在乐律、天文、计量、算学等各领域的内涵，对于中华文明的传承发展具有相当重要的意义。

在中国古代传统文化的发展中，最先最早且研究最深入的是古代天文学与声学，这是两门与数学密切关联的基础学科，由于涉及到礼乐教化，同时在阶级统治中具有相当重要的作用，关于此两门学科的研究无论是发生时间还是研究深度都具有相当优越性。自从司马迁著《史记》伊始，历朝历代有关这两门学科都在正史文献中专门开辟出相应的章节加以记述。但是近代以来，关于声学的研究，却并没有如古代天文学的研究般同步发展，关于乐律声学的研究水平，亦远远没达到同早期的天文学相应的发展阶段。诸多理由并不充分的论断、不尽准确的关于时代的判断以及极有可能是武断的、错误的理解林林总总，不一而足。例如中国古代音乐乏味并且单调，古代音乐缺乏半音，古代音乐欠缺八度，以及古代音乐只有五声等等偏见成见，始终存在。

1962 年出版的李约瑟著作《中国科学技术史》第 4 卷中有关于声学的部分，以及在此之后相继而来的各地诸多考古发现及研究，大大地改变了中国古代乐律学研究的发展面貌。在此基础上，许多学者也开始重新审视和认识古代中国乐律研究的成就。近三百年以来的科技发展史上，中国的科学技术发展水平往往被认为是停滞甚至退步的，这有片面且考虑不周的因素在内，但是不可否认的事实是，面对工业化以来突飞猛进并且在全球积极扩张的新兴西方工业化国家不仅是在经济上的入侵与剥削，更是在文化上的主导与输出，当时的中国在政府层面和民间层面同时陷入了彷徨无措的境地，朝令夕改的求变措施透露出中国文化与西方文明在两相冲突时的无奈而不知应对，三千年未有之变局下的近代中国一步步陷入了落后

与越追越远的困境之中，这种忧患的状况促使中国的知识分子开始反躬自省，一些激进的学者未加深究, 在渴望全面改进的急迫状态中探索中国何以未能参与到全球现代化尤其是工业革命以来的科技现代化的原因时，将古代中国和中华传统文化一棍子打死，错误地宣布中国文化在传统中即缺乏科学技术的发生基础, 也完全无视和否定中国古代文明的业已取得的成果。由于“ 现代科学 ”的革命首先发端与西方，很多学者便因此认定，西方文明必然存在着导致科学发生与发展的积极因素在内， 与此同时，“ 现代科学 ”没有在中国发生和发展，那么必然, 中华文明的基因中便一定缺乏导致科学发生与发展的积极因素, 更有甚者甚至断言, 中国文化在根本上便是阻碍科学发生于发展的。以此类推下去，差不多所有涉及中国古代文明的领域或多或少都被认为是阻挠科技发展的，这种错误的以果推因的看法，在今日全球化的局面下看了，虽然在理论动机上是出于好意，目的是望求促成中国崛起和接轨与时代，但是由于其在本质上的错误，往往会损害中华文明的发展与传承。

体现在声学乐律的研究中，将孤立的片面的因素作为现代化的科学技术的发展的原因，就会得出如上所述的各种错误的、片面的、武断的结论，进而否定我国古代的声学研究成果乃至加以批判，例如由于缺乏实证而否定“ 三分损益法 ”，由于推导技术的不完备而否定否定古代声学中的半音，更深一层的后果是，尽管学术界对于中国远古时期“ 同律度量衡 ”学说的发展与改革在理论上秉持积极的态度, 但是由于始终无法推导出同律度量衡换算的正确方法，或者对于已经存在的古代换算方法在验证上存在操作困难，同时由于考古发掘也一直未能找到上古时代可以用作于印证“ 同律度量衡 ”学说的律管或者是弦乐器，有关于“ 同律度量衡 ”学说的正确性始终存疑。事实上，科学技术的发生发展，往往是各种复杂的、动态的各方面因素相互影响作用的结果, 甚至包括往往是相互矛盾的各种因素在某些特定范畴内积极作用的结果, 这些作用会因时而异。生活在中世纪的欧洲人, 面对唐宋时代的中国文明, 面对最辉煌时期的中国科技发展时代，倘若依照这种错误的方法，同样会得出西方文明是阻碍科技发展进步、中国文明具有基因中的积极层面的结论。由此可见，随着时代的发展，科学技术的不断进步，往往会在后继的历史时期，重新认识到不处于同一发展阶段的不同文明中的研究成就。近年来，随着现代声学理论的发展以及物理学技术手段的进步，我国古代声学研究的技术支持得以完善，一大批国内外学者相继在这一领域提出了自己的真知灼见。同时，随着我国近年来集中出土了诸例成组玉石璧，尤其是幸晓峰研究员主持的我国出土成组玉石璧的部分考古遗址调查及音乐声学测量课题研究的结题[1]，加之海外学者程贞一先生对湖北曾侯乙编钟的声学研究成果的发表，我国“ 同律度量衡 ”学说的标准问题研究有了进一步深入的可能。

[1] 幸晓峰、王其书《三星堆-金沙出土玉石璧的音乐声学性能研究》.《音乐探索》2006.2.

2、理论框架

我国古代历朝正史中均将“ 律 ”与“ 历 ”合二为一，作为一志。历朝开元之初，必定要首先订立本朝代的“ 正音 ”音高；在此同时，也必定要确立本朝将要使用的历法。社会的日常生活倘若缺少这一环节，那么交易和买卖中便无法衡秤斤两，耕作和种植时也无法遵循时令，基于此种原因，各朝各代的统治阶级都把乐律标准化视为国之重器。一旦忽视这个关节，便会像孔子所言，国家社会将“ 礼乐崩坏 ”。因而标准律制的确立和制定是关系国家兴衰稳定的重要事情。

《尚书·尧典》载：“ 帝曰：夔，命汝典乐教胄子。诗言志，歌永言，声依永，律和声。八音克谐，无相夺伦，神人以和。”又曰：“ 我欲闻六律，五声，八音。”

《礼记·乐记》曰：“ 昔者舜作五弦之琴，以歌《南风》。夔始制乐，以赏诸侯。”

《吕氏春秋·察传》曰：“ 昔者舜欲以乐传教于天下，乃令重黎举夔于草莽之中而进之，舜以为乐正。夔于是正六律，和五声，以通八风，而天下大服。”

《史记·五帝本纪第一》曰：“（舜）以夔为典乐，教穉子，直而温，宽而栗，刚而无虐简而无傲；诗言意，歌长言，声依永，律和声，八音能谐，毋相夺伦，神人以和。”

《汉书·律历志》说：“ 黄帝使泠纶自大夏之西，昆仑之阴，取竹之解谷生，其窍厚均者，断两节间而吹之，以为黄钟之宫。制十二筩以听凤之鸣。其雄鸣为六，雌鸣亦六。比黄钟之宫，而皆可以生之，是为律本。至治之世，天地之气合以生风；天地之风气正，十二律定。”

我国古代的文献典籍中关于玉声用于音乐的明确记载，广泛见载于《尚书》、《诗经》、《礼记》等诸多文献资料中。

如：王宇信考证卜辞所见殷人用玉：“ 31.甲午卜，争，贞王奏兹玉，成佐。甲午卜，争，贞王奏兹玉，成弗佐。（《合集》6653 正） 32.-----奏玉-----（《合集》16086）。 49.戊戌卜，争，贞王归，奏玉其伐。（《合集》6016 正）”。又如《诗经 · 大雅》中的许多章句，直接描写宫廷祭祀时的音乐舞蹈，《大雅 · 棫朴》：“ 芃芃棫朴，薪之槱之。济济辟玉，左右趣之。济济辟玉，左右奉璋，奉璋峩峩，髦士攸宜。”这是用于祭天仪式中的歌舞，毛传：“ 槱，积也 ”。《玉篇 · 木部》：“ 槱，积木燎以祭天也。”“ 济济辟玉 ”应该是对璧玉发声的描述，玉璧与玉璋均可作为乐舞用具，之后或可燔燎，但举行仪式时有乐舞，这首诗对乐舞形式和乐舞歌词的描写非常具体和生动，只是学术界对《诗经》中乐舞形态的研究比较薄弱。《礼记正义 · 聘仪》载孔子答子贡问贵玉贱珉之理，曰“ ……垂之，如队，礼也。叩之，其声清越以长，其终诎然，乐也。”郑玄注曰：“ 乐作则有声，止则无也。”文中将美石之珉的发声与可发音乐之音的玉声作了区别，描写可“ 扣之 ”和“ 乐止 ”时玉器奏出的不同音乐风格，扣之则清脆悠扬，在空气中传播远闻，终止乐曲时，其利用了玉璧发音音长较短、共鸣声不强的声学特征，可以用刮击方法演奏而使乐曲止绝。

而历朝历代在开国之初，都要进行如隋代开皇乐仪般的定黄钟音的仪式，这是统治的需

要，也是实际生活的需要。而这种正律方法一般认为是记载于《管子》、《史记》、《吕氏春秋》中的“三分损益法”，由于此种方法是以弦、管作为正律器，现存并无实际考古例证，所以后世如京房、朱载堉等学者在计算误差时都只能做到“悉无差违”的效果，并不能完美地解释。

近年来，随着我国集中出土了诸例成组玉石璧。如：良渚文化高城墩遗址、反山遗址；齐家文化甘肃省皇娘娘台遗址、青海省喇家等遗址；陕西省商州市东龙山遗址；金沙、盐亭、三星堆遗址相继出土了诸例成组玉石璧。

在我国出土的玉石璧当中，成组玉石璧可以作为一种类型，1931 年四川广汉三星堆真武村月亮湾发现一个土坑中有序排列的三组玉石璧，是我国最早发现的成组玉石璧。2000年陕西商洛东龙山遗址两座墓葬中分别出土有序排列 16 件制、8 件制成组玉石璧，提供了科学考古发掘出土成组玉石璧的可靠例证。2004 年以来，由幸晓峰负责的课题组，使用电子技术对 139 件玉石璧做音乐声学测量，证明成组玉石璧具有良好音乐声学性能，很有可能是长江流域出现的早期玉石乐器，从远古时期到商周之际，被用于巫乐和礼乐祭祀，同时也很可能是我国自虞舜到周代“同律度量衡” 的标准用器。

1994 年，美籍华人学者程贞一出版专著《TWO-TONE SET-BELLS OF MARQUIS YI》，在对湖北曾侯乙墓编钟的声乐性能研究中采用了大小半音的换算方法，证明了我国古代文献中记载的“三分损益法”、“以律出度”等学说不仅在理论上是可以成立的，而且以曾侯乙墓编钟为考古实证，作出了详尽分析和证明。这为研究成组玉石璧承担标准律器的功能提供了有力的参考依据和全新的比较方法。

在“同律度量衡”学说中，“以律出度”是至为关键的一环。科学的理论必须要在实践中具有可操作性，要证明这一学说的科学性，就需要找到支持这一理论的标准器。但是，传统的“三分损益法”，单纯通过给定基础音，然后以律管长度比例关系来推出各律的方法，由于弦管乐器难于保存，缺少考古实证，因而始终难以正名。因而，随着各地成组玉石璧的出土，同时玉石璧又具有音乐性能，这就引发了我们的猜想：成组玉石璧能否承担标准器的功能呢？

所谓标准律器，就是具有调音性能，可以以之为基础调校其他各器各音的乐器。标准器本身也是乐器，同时它又具有调校的功能。要证明成组玉石璧具这种功能，关键在于三点：首先，成组玉石璧本身要具有一定的音乐性能，这是作为标准器的基础；其次也就是最重要的，成组玉石璧的测音数据结果通过演算，是否符合一定的律比关系，只有符合律比关系，成组玉石璧才能作为标准器能调校各音，也才能以给定黄钟基础音为出发点推生出其它各音；最后，成组玉石璧的这种律比关系的符合，不是偶然的巧合，而是确定无疑的人为设计而成，这样才能说明这种调校功能是人为设计制造的，专门为承担标准器功能而做。

本文将以三星堆遗址（真武仓包包）出土玉石璧为例，初步分析成组玉石璧可以作为标准律器的功能。这将有可能解决同律度量衡换算方法的困难，为“同律度量衡”学说研究提

供实物及理论依据，同时为我国古代乐律学、古代计量学、古算学的研究提供新的思路，为我国古代礼乐文明的研究提供新的方向。

3、研究方法

在研究方法上，本文采用的大小半音生律方法，是程贞一先生的发明，用在曾侯乙编钟的研究中。而在玉石璧的研究中属于首次，同时将大小半音、三分损益的生律方法，通过数学分析法进行结合，同时用以研究玉石璧的音乐性能，也具有一定的新颖性。在研究意义上，如果能证明玉石璧的标准器功能，将为“ 以律出度 ”、“ 同律度量衡 ” 研究以及礼乐文明和中国古代文化的研究提供一定的依据，具有一定的特色。

人们生活在充满声波的自然环境中，对手音响的感知和体验，出于自然和本能。最早激起人们兴趣的；就是音程的发现。几个独立的声音，同时发出或者先后发出；能愉悦人们的听觉。更微妙的还在于，并不是所有令人愉悦的声音，在同时演奏时都能使人获得愉悦感，从而促使古人爱现了协和音程。音律学上这个发现，是从美学角度而不是从物理标准去考虑的。音律学与美学相互交融，激发古人取得音律学上不同凡响的巨大进步。本章讨论中国人早期的吾律学成就。

1 音乐声学萌芽阶段

音乐的产生，一定是远在发现音阶之前，只是我们无从知晓它的发展过程。大多数古代音乐的重要信息，来自出土的古代乐器。中国文明现存最早的乐器，可以追溯到新石器时代，譬如公元前 6000 年河姆渡文化的骨哨和公元前 5000 年仰韶文化的陶埙。出土的商朝乐器，能保持发音功能的就比较多了。商代的青铜钟和石磬往往成组出土，大多是三个一组，后世称为编钟和编磬。由于侵蚀损坏，商代编钟的音已变质，不如有些出土编磬的音质。图 3.1.2 展示一套三枚编磬，安阳殷墟出土，编磬铭文上具有律名。

民族音乐研究所测量了这套编磬的频率，下表中列出实测频率和理论推算频率作一比较。假定“ 永启 ”律 948.6 赫兹为已知，分别用大二度 $\frac{8}{9}$ 和纯四度 $\frac{3}{4}$，求得理论频率 1067.2 赫兹和 1264.8 赫兹。石磬音程的排列，与用《管子》上下五度相生法推导的商调式前三个音十分贴近。

商代一套三枚编磬定频率，与理论推测频率值的比较

音名	实测频率(赫兹)	理论频率(赫兹)	“ 永启 ”律一调式	
			商调式	徵调式
永启	948. 6	948.6(给定值)	商(re)	徵(s01)
永余	1046. 5	1067. 2	角(mi)	羽(18)
夭余	1278 7	1264. 8	徵(s01)	宫(do)

分析这三个频率之间的音程，与大二度和纯四度相比较：

永启—永余 $\frac{948.6}{1046.5} = \frac{8}{9} + 0.018$,

永启—夭余 $\frac{948.6}{1278.7} = \frac{3}{4} - 0.018$,

编磬各律之间的音程测定值确实接近于大二度和纯四度，特别是四度谐和音率 $\frac{3}{4}$，绝对差仅仅为 0.008，不是普通人耳所能分辨的。音程安排十分符合商调式和徵调式的前三个音。吻合到如此程度，凸现出古代中国在商朝时就已认识到，由一个全音和一个小三度所构成的“三音列”。事实上，“三音列”在五声音阶中的作用，类似于“四音列”在七声音阶中的作用。

古代已经有调音用的十二律。按乐师州鸠的说法，在六律中插入六个称作为六间的间隙律，可得到十二律。值得注意的是，这些律名都是双字名。《国语》记载州鸠说，先由神瞽确定三个中音，接着均分三个中音为六律，最后完成十二律。我们完全有理由推测，州鸠所提到的三律，与石磬数据为例的“三音列”有某种对应关系。而且，石磬铭文上三龠律名也都是双字名。这些不是等音程音，它们在五线谱上的位置标记着近似的频率。频率及相应之间的绝对偏差并不明显，因为十一个音的测定频率并没有上述结论同时发表。音阶中一个有意义的发现，就是半音音程。事实上，在这十一个所测的音中，已出现七个相连半音。这似乎表明，商代晚期音乐家也许有了十二律的初步概念。

2　律的标准化和旋宫原理

旋宫原理是古代中国重要的音乐理念，按照这个原理，一个音阶中的每个音都能轮流作主音，生成相应的高工。《礼记》说：

五声、六律、十二管，旋相应宫也。

【释文：五音音阶、六律音阶和十二管律的音阶中每一个音轮流作主音。】

旋宫原理来自这样的认识：音阶中各音之间的音程是相关的，因为这些比率与标准律（频率）的绝对值无关。因此，各音中的任何一个，都可以作为主音，成为起始的最低阶。

古代五声音阶用一组单音节字表达，以升序排列，即：宫、商、角、徵、羽。这些单字音名分别表示五声音阶各音音级，标记各音之间的音程。因为八度之间律音的每一排列成为一个调式，而这调式的排列均以其主音(最低律)相对而定，逐渐地，调式就冠以主音名而加以识别。在五声音阶中，照旋宫原理可辨别五个不同的调式，相当于每一个律音轮流作主音的五个不同排列。例如，商调式是一个以商音作为主音的律音排列。公元前 5 世纪，甚至可能更早，古代中国就已导出一个可计算特定调式音阶中各律音的方法。

除了相对音阶的导出，古代中国也很早就着重绝对律音阶的制定。早在公元前 6 世纪，十二律就用来调节乐音。因为每个律能用来定基音之律，调式种类因律数的增加而进一步扩

展。旋宫原理的发现，促使人们进一步认识律调的多样性。孟轲(公元前 372 一前 289 年)的《孟子 · 离娄》就反映了这种观念：

既竭耳力焉，继之以六律，正五音：不可胜用也。

【释文：如要竭尽耳之听觉，可进{步以六律调正五声音阶，（由此得出的多样律调，）并非容易穷竭它们的用途。】

周代已出现了十二律的名称，那时的音律学家已经拥有统一的律调术语系统。公元前 120 年的《淮南子》，明确讨论五声音阶以十二律调所得出律调的多样性：

一律而生五音，十二律而为六十音：

【释文：一个律音可派生出五种调技。十二个律音构成六十个调式。】

近代考古发现表明，周代各国曾出现过平行的律名系统(即同宫系统)，然而律调术语系统的原则保持不变。例如黄钟一宫和太簇一角，就分别指黄钟律为基律的宫调式和太簇律为基律的角调式。

律的标准化之所以很早在古代中国实现；可能源于古人为了充实音乐的色彩，喜爱把不同乐器放在一起演奏。《诗经》明确记载，中国文明中很早就有人同时演奏不同种类的乐器。这个措施无疑使古人发现，要做到这一点，必须事先协调各种乐器的音律。这就促进了古人对标准化律的认识和兴趣。

测量出土的商代至今尚有发音功能的不同乐器，发现有律音在可容频率误差内几乎相同，说明早在商代就有标准化律的倾向。《尚书 · 舜典》第一个提到律的标准化。曾侯乙编钟的发现和出土，提供了古代标准律相当具体的频率信息。值得注意的是曾侯乙编钟中上层 2 排 6 号的钮钟。此钟的商音，有铭文标明是“ 黄钟之宫 ”，测定此钟我们知道，公元前 5 世纪黄钟律的相应频率，大约是 410．1 赫兹。

3 玉石璧测音实验方法

本文旨在证明成组玉石璧具有可作为标准律器的功能，具体方法将以现代声学基本原理为基础，以实际玉石璧测音数据为蓝本，通过如下方法对成组玉石璧进行研究：

通过对成组玉石璧的测音数据研究，业已得知成组玉石璧本身具有的音乐性能(即音名、音高、音频、音分各个数据)，这些已有的成果向我们展示出不同于以往传统的对中国古代音乐的认识，即五声音阶、五度相生、以管长来生出基础音以外的其他各音的方法等。除此之外，我们还能看到成组玉石璧具有 7 声音阶，成组排成音列、各音之间八度相生，而恰好又符合大小半音生律规律，以弦长变化为比例形成律比关系，以此为基础来衍生基础音以外的其他各音。这些成果都令人惊叹，而要验证成组玉石璧承担标准律器的功能，具体方法步骤如下：

（1）大小半音法

通过使用程贞一先生的大小半音方法，即不仅仅是在给定基音的条件下，假设存在一支

律管，通过管长变化（增加三分之一或减少三分之一），实现频率的改变，这样得出的频率律比仅仅只有一个数值即四分之三，因此不能解决旋宫等问题。而大小半音法在此基础上，还考虑到了一列音阶，一个八度范围内，大小半音的变化，除了四分之三的律比值之外，引入九分之八的律比值（此数值不见与《管子》《吕氏春秋》，但是见载于《史记》，但不能被管长的演算所符合，所以一直没有被采用），这样即使没有有律管存在，也不用寻找某一种弦乐器，只通过律比关系本身，就能够推生出八度内各音。这是在对编钟的研究中发现的新方法，这一方法同样可以应用于理论上同为打击乐器的玉石璧。将比例九分之八结合四分之三的作为律比关系，摒弃了传统的仅仅通过管长四分之三的计算，这样再得出以黄钟音为给定基础音的情况下，其他各音间的音频音分的关系之比，然后将实际测量的玉石璧数据结果代入验证，便可知其是否符合，从而也可知道玉石璧本身是否具有调校音列的功能。

（2）三分损益法

古代社会生活虽然并没有现代生活在多样性上的繁复，但是在一元化的的间架性统治中，作为礼乐大事的音乐本身，反而具有更加重要的位置。不仅在保证社会稳定的功能上，音乐有着正音的作用，在实际社会生活中，礼乐本身也同样具有相当重要的地位。由于这种重要性，故而历朝历代均需要在开朝之初进行正律，而这种正律方法一般认为是记载于《管子》、《吕氏春秋》中的“三分损益法”，由于此种方法是以弦、管作为正律器，现存并无实际考古例证，所以后世如京房、朱载堉等学者在计算误差时都只能做到“悉无差违”的效果，并不能完美地解释。

传统记载的三分损益法，以五声音阶五度相生，以旋宫方法为基础得出五声之间的律比关系，这在无声音阶的推衍过程中是可以验证的，但是考虑到相当的误差值，故而适用范围有限，考虑到成组玉石璧的年代因素，不能排除玉石璧即使有作为标准器的功能，也有可能仍然是符合这一律比关系的可能性，因而，在论证过程中，必须结合三分损益法以及大小半音的方法同时进行，采用两种方法都得出各器之间的律比关系；然后将二者进行对比，找出异同；最后结合成组玉石璧的测音数据，分别代入两种方法进行验算，看成组玉石璧是否符合这些律比关系。是全部都能符合，还是仅仅符合一种，还是都不符合，这样才能更精确地验证出成组玉石璧调校功能的强弱。

（3）模拟验证法

成组玉石璧本身假如成组玉石璧符合以上的演算结果，也就说明成组玉石璧符合这些律比关系。但是偶然的巧合是普遍存在于理论实验中的。在科学理论的论证中，必须排除掉这些巧合的因素。要排除掉这些巧合，同时也是排除掉出土的成组玉石璧由于年代因素可能存在的误差，我们可以通过仿制出成组玉石璧，在器形、音质上与原璧完全相同的条件下，对

仿制的成组玉石璧进行分析。

通过对仿制的成组玉石璧一组进行音乐性能的测量得出乐理数据,同时通过理论假设计算出的理论上仿制的成组玉石璧应该具有的音乐性能数据结果，再将二者进行比对，看仿制出的成组石壁的测量结果是否与理论应有的结果相吻合。倘若仿制的成组玉石璧不能符合,那么,即使原璧的律比关系符合程度再高，那么，它也仅仅肯能只是一组完美但是碰巧能有调校功能的打击乐器,而在设计本身并没有赋予它标准律器的功能。而如果连仿制的石壁都能符合,那么以管窥豹,我们便能以此揣测出设计者的用心,即成组玉石璧不仅仅本身具有音乐性能,可以作为打击乐器使用，它极有可能是人为设计出的，还可以具有承担标准律器的功能的一组乐器。

“同律度量衡”的学说，关键在于“以律出度”，“以律出度”的关键，在于是否能够找到用以作为标准器的古乐器。但是管乐器弦乐器在考古保存上的困难使得学界一直没有考古实证可以研究。而成组玉石璧的出土，给了这一学说实证上的依据。

成组玉石璧本身是具有音乐性能的，那么，它有无可能也同时具有承担标准律器的功能呢？随着现代声学的发展和物理学技术的不断进步，研究这一课题的技术手段已经成熟，我们可以通过现代化的测音调音数学分析等各种方式对成组玉石璧这一现如今仅存的古代乐器做各种研究。

而随着诸多海内外学者对这一课题的兴趣日趋浓烈,许多研究成果和方法也被吸收和借鉴到国内来。尤其诸如美籍华人学者程贞一先生对曾侯乙编钟的研究,采用的大小半音推算方法,更是使得单纯计算管长来生律的局限性有了大的突破。因此，从这个角度讲，选定此题在理论上具备一定的合理性，而在技术上，也具备了相当的可行性。

第二章　理论基础

1、三星堆遗址（真武仓包包）出土成组玉石璧的音乐性能情况

1987 年 10 月 11 日，三星堆遗址真武仓包包砖厂民工取土时，发现铜牌饰、玉瑗、玉凿、石璧、石斧等文物，广汉市文馆所和四川省文物考古研究所三星堆遗址工作站工作人员，当即赶赴现场调查，并将民工手中的文物全部追回，但挖掘现场未能完好保留。随后，详细调查出土埋藏情况并整理发表了《三星堆真武仓包包祭祀坑调查简报》[2]。

三星堆真武仓包包共出土玉石璧 21 件，其中 A 型玉石璧 11 件，从大到小，呈梯次递减变化，件与件之间相差一厘米左右；B 型 10 件，形体较小，厚薄不均，是利用 A 型石璧芯再管钻出好孔而成。A 型玉石璧为本课题研究对象，按直径大小顺序排列，出土标本号：87GSZJ：13、87GSZJ：37、87GSZJ：1、87GSZJ：2、87GSZJ：3、87GSZJ：4、87GSZJ：5、87GSZJ：18、87GSZJ：19、87GSZJ：20、87GSZJ：22。

根据音乐性能测量得出结果如下:

测量 10 件，按直径大小排列（标本编号简化用“J”表示）：

标本号：	J：13	J：37	J：2	J：3	J：4
频率（Hz）：	3214.22	3987.27	3415.20	1098.30	3536.10、
物理音高：	G7+34	B7+7	#G7+39	#C6-25	A7+0
音名：	g4+34	b4+7	#g4+39	#c3-25	a4+0
音强（dB）：	19.61	27.43	23.12	16.21	18.70

标本号：	J：5	J：18	J：19	J：20	J：22
频率（Hz）：	2679.98	2257.12	2506.57	2575.50	4356.47
物理音高：	E7+20	#C7+22	#D7+4	E7-49	#C8-39
音名：	e4+20	#c4+22	#d4+4	e4-49	#c5-39
音强（dB）：	27.85	18.80	18.46	21.11	36.65

音高序列：#c3、 #c4、 #d4、e4、e4 、g4 、#g4 、a4 、b4 、#c5 。

音阶排列：(#c3)、#c4 、#d4 、e4 、g4 、#g4 、a4 、 b4 、 #c5 。

简谱表示：　　6　7　1　#2　3　4　5　6　。

传统阶名表示：　羽　（变宫）　宫　（清商）角（清角）　徵　　羽　。

---

[2] 三星堆考古工作站等.三星队遗址真武仓包包祭祀坑调查简报[R]，四川考古报告集，文物出版社，1998。

2、成组玉石璧的形制特点

成组玉石璧：是我国新石器晚期至商周之际，出土玉器中的主要种类，广泛分布在我国长江黄河两大流域地区，以及北部辽河流域地区。玉石璧的出土放置情况表明：以 2 件以上成组排列为主要特征。如新石器时代晚期如良渚文化反山遗址、齐家文化皇娘娘台、喇家遗址等都出土多组 2-6 件制玉石璧，江苏寺墩出土 24 件玉璧，绕尸骨一周，是值得注意的现象。夏、商时期出土玉石璧，如陕西商洛东龙山遗址，殷墟遗址等，已出现 8 件、16 件制玉石璧，排列非常有规律。晚商至商周之际如四川广汉三星堆、成都金沙遗址出土玉石璧，以 10 件制定型，并伴出两组 4 件制大石璧。

由此，我们提出成组玉石璧为我国出土玉石璧中的一种类型：以两个条件为基础：一是出土于同一墓葬或土坑，大小不同，成梯次有序或可以有序排列；二是音乐声学测量已构成音列或音阶。

3、成组玉石璧的音乐声学测量及实验理论

使用电子设备《通用音乐分析系统（GWAS 2 0B)》和电子测音技术，对上述各遗址出土 139 件玉石璧做音乐声学测量和分析，取得科学准确数据。研究证明：玉石璧具有良好音乐声学特征，单件玉石璧音高清晰、纯净，频谱图显示基音强，泛音排列符合规律。成组玉石璧构成音列，其中有 4 组（8 件、10 件、11 件、16 件组合）排列出不同调式的五声或七声音阶。

在此基础上运用实验考古学和实验音乐学研究方法，对三星堆真武仓包包出土 11 件成组玉石璧做了复原调音实验研究。

调音实验分两个阶段进行：第一阶段，通过对四件不同材质“璧”的制作和调音实验，证明了材质（硬度和密度）、璧的大小（通过直径变化）和厚薄，是影响“璧”音高的主要因素；孔径的大小，对音强会产生影响；只要符合“肉倍好”比例，对音高影响甚微。第二阶段：以三星堆真武仓包包出土 11 件成组玉石璧为原型，通过加工改变玉石璧直径大小和器面厚薄，可以有效调整每件璧的基音；再通过反复磨琢璧面两侧边缘或其它部位，可以在 50 音分内校准音高。成功复原加工制作出材料、形制、音乐声学特征基本相同的成组玉石璧一套，进行实验分析。

4、现代声学中有关于律学的基本知识及理论情况

论证成组玉石璧的声乐性能，尤其是作为标准器的功能，必须要计算成组玉石璧中每一件璧的音高间的律比关系，而这个比值我们既可以通过实际测量本身得到，也可以通过业已

存在的理论得到，然后将实际测量的比值与理论的比值对比，便可以得出成组玉石璧的音高间律比关系，是否符合一定的规律。

那么问题在于，我过古代文献的记载和古代律学研究的成果，大多数采用的是四分之三的比值，详见与京房、吕纯一、朱载堉等学者的研究中。他们都是以管长为基础而进行计算的。但是考虑到现代声学的发展研究成果，在本文论证过程中，不仅采用了四分之三的比值用于计算，还采用了另一种比值关系即九分之八。这样可以更全面地对成组玉石璧的律比关系进行分析。

（1）计算方法中频率比值的九分之八的由来

西方音律学系统与中国音律学系统具有本质的不同，基本不同点在于八度和四度的比率。所谓中国音阶缺乏纯八度和纯四度的论调，本来早已出现于西方著作中，但他们两人的表述毕竟比较清晰，比较齐全。为澄清这些陈词滥调，我将多次引用李约瑟和鲁宾逊的著作。

律学家和科技史学家曾一致认为，中国音乐理论中没有纯八度概念。例如巴塞洛缪(Bartholomew)《音乐的声学》（Acoustics of Music）一书中，有这样一段 :“ 八度是唯一一个在所有音阶中都能找到的音程，不管在哪一个国家，也不管在哪一个历史时期，都能找到八度，甚至在理论不纯的中国古代音乐中，十分正确的八度仍然可能在实际应用中出现 ”。李约瑟和鲁宾逊对中国古代音律理论有下列评述另一方面, 中国十二律音列只需要最简单的数学运算，并不用八度起算。确切地说，它甚至完全不包含纯八度。

前文介绍过古代中国导生音阶的方法，介绍五声音阶的推导以及上下相生原理、半音音阶导构法。所有这些例子，不但体现自切概念，而且包含了八度的基本演算。八度概念有原始的记录，无需仰仗后人的分析就能找到。我们在《吕氏春秋》的半音音阶图上，叠加了《管子》的五声音阶，十二音阶之林钟音与五声音阶之 “ 徵 ” 音的音程比为 54∶108，确实为纯八度 1:2。同样，南昌音与 “ 羽 ” 音的比为 48∶96，也确实为纯八度 1:2。这实在是顺理成章的，上下相生原理的基础就是八度的确切概念。

可以看到，“ 林钟一宫 ” 律调与爱奥利亚调式的希腊音阶具有完全相同的音程。由此可见，不但三分损益法所导生的十二声音阶，内嵌着古希腊七声音阶，而且三分损益法所导生的七声音阶，就是古希腊七声音阶。李约瑟和鲁宾逊所说的纯四度问题出于不适当的比较。

值得注意的是，类似纯四度的现象也出现在纯五度上，我们可以看到，仲吕律调中的五度比纯五度要略微降低∶这个出现在仲吕律调中的五度差值，不存在于其他十一个律调中，类似于四度差值，也只出现在一个律调中。能不能就此丽得出结论，说毕达哥拉斯音阶和中国音阶的五度比值不同？这个问题与上面如何看待四度的问题，事实上属于同一件事。两个问题的答案，同样应该是否定的，不仅仅因为单独的仲吕律调或黄针律调都不足以代表整个中国音阶系统，而且因为单独的爱奥利亚调式（或利第亚调式）也都不足以代表整个希腊音阶系统。古代希腊人对音序改变和乐律音阶、音程变化同样地感兴趣和喜爱，并习惯于按部

落命名音阶的不同调式。如果把旋富原理应用到以爱奥利亚调式为代表的音阶上，就会得到一组与总体结构相同的音阶系统。. 遗憾的是，有关早期的希腊调式系统，缺乏详细的文献记载，这一段历史至今仍然模糊不清。

中国音阶系统和希腊音阶系统具有惊人的相似性。在十二半音律调中有七个内嵌着古希腊七声音阶，与毕达哥拉斯七声音阶完全一样，只有一个律调的四度和另一个律调的五度出现差值之外，其他律调的四度和五度都是纯四度和纯五度。若以七声音阶互相比较，则基本上一样。事实上，纯四度和纯五度早就出现在以理论推导出来的五声音阶中，那就是现存最早记载子《管子》的微调五声音阶。由此可见，纯四度和纯五度与纯八度一样，不仅仅在实践中得到应用，同时也可以从理论推导出来。值得提出的是，这个“ 四度差值 ”出现在黄钟律调中，或“ 五度差值 ”出现在仲吕律调中，并不是一个独特的现象，因为. 利用不同十二律的选择，都可以把这个“ 四度差值 ”(或“ 五度差值 ”) 由黄钟（或仲吕）转移到其他律调中，而不改变音阶系统的总体结构。前文说到，《吕氏春秋》选择的十二律，并不包括未加命名的 F ’律。假如在十二个选得律中，把仲吕(F)律换成未加命名的 F ’律，可得到一个排列不同的十二律半音音阶。

依据现代物理学的原理, 声音的本质是空气的振动, 而空气的振动以波的形式进行传播, 这种传播称作为声波。所有的波（包括声波、电磁波等等）都有三个最本质的特性：频率、振幅、相位。对于声音来说, 声波的频率(声学中一般不考虑波长)决定了这个声音有多“ 高 ”, 声波的振幅决定了这个声音有多“ 响 ”，律学研究的重点就是声波的频率。一般来说，人耳能听到的声波频率范围是 20HZ（每秒振动 20 次）到 20000HZ（每秒振动 20000 次）之间。声波的频率越大 (每秒振动的次数越多)，听起来就越“ 高 ”。频率低于 20HZ 的叫“ 次声波 ”, 高于 20000HZ 的叫“ 超声波 ”。

人耳对于声波的频率是指数敏感（即人耳朵对于声波的敏感度是呈现出指数规律排列）的。某一组声音，如果它们的频率是严格地按照×1、×2、×4、×8……，即按 2n 倍数方式的规律排列的话，它们听起来才是一个“ 等差音高序列 ”，也就是说，只有这样排列的一组声音，才是和谐的，也才能被称作音乐，否则就仅仅指数单纯的声音或者杂音、噪音等。现代声学将这种等效性，定义为“ 等差音高序列 ”的直接结果。×2 被定义为一个“ 八度音程 ”。只要是一个音的频率是另一个的两倍，它们就是八度音程的关系，和具体某一个音有多高没有关系。一个音的所有“ 八度音程 ”都是它的“ 谐波 ”，但不是它的所有“ 谐波 ”都是自己的“ 八度音程 ”。

假设任何振动的物体都是乐器，我们将这一乐器视为理论上的一根弦。同一根弦，在不同的情况下振动，可以发出很多频率的声音。在听觉上，与主音 F 最和谐的就是三分之二 F（主音）和四分之三 F（除了主音的其它各个八度之外）。在实际中，四分之三 F 已经比三分之二 F 的和谐程度要低不少了，但是这样在给出主音的情况下，便可以推生出其它各音，但是无法得到三分之二 F 本身的三分之二，因而为了生成这个音，在得到这两个频率之后，

为寻找与最和谐的那个音最和谐的音，将三分之二 F 进行平方计算（这同样是符合等差音高序列的），得到九分之四 F。可是这个音已经超出了两个八度的范围，进入了下一个八度，由于存在有“ 等差音高序列 ”，即在下一个八度中有与它等价的一个音，于是再把九分之四 F 的频率减半，便得到了九分之八 F。从而以此比值为基础，类推而导生出各音阶。这恰好与《史记》中记载的生律方法所符合，因为我们可以假设，史记所载九分之八，并不一定需要存在一根律管作为基音，这样便能解释符合现代声学原理的九分之八的律比值的关系了。

（2）计算方法中频率比值的四分之三的由来

利用上下五度相生法导生的五声音阶和半音音阶之间八度关系示意图。《吕氏春秋》三分损益法原文原术，明白无误地使用八度的确切概念。根据三分损益的生律途径，在上生出蕤宾律之后，接着应该生出大吕律。原文称大吕“ 为上 ”，因而形成连续两次上生。这里之所以上生之后再跟着一次上生，正是因为上下相生原理，需要把生出的大吕律移回到八度范围内。为便于观察，我们把黄钟基音数 81 改写成 1，使得八度范围内所有音程数据都介于 1 和 0 之间，这等于用 1 作为推算音阶的起算数。如果由蕤宾律下生大吕律会得到 o. 4682，不在 1 和 0 之间。那就是说，下生所得的大吕超过了八度范围，根据上下相生原理，只好改用上生。《吕氏春秋》采用的正是上生。如此得到的大吕律是 0. 9364，保证了大吕律位于黄钟基音的八度范围内。上生和下生的大吕律这两个值，正相隔一个八度，证明八度的确切概念，不但得到了正确的理解，而且明白无误地出现在早期中国音律学家和音乐家的实践和理论中。

尽管半音的排列不同，由于音阶系统的循环性质，相对于系统的总体结构来说，两种选择法实际上是等价的。这种现象可以证明如下：通过 F 7 律和应钟律画一条线，作为八度圆的对称轴，再关于此轴作 1800 折叠式旋转，上面已经论证，所谓的中国谐和音率知识外来论，是没有具体证据的。同时也论证了中国人不但知道这些比率，而且还能在音阶中推导出这些比率。现在转向另一个问题，考虑比率的测量。有些学者虽然认为谐和率知识在中国是独立发现的，但提出了这种发现是建立在律管上的还是建立在张紧的弦上的疑问，因为中国音阶有所谓的“ 四度差值 ”和“ 八度差值 ”，同时，中国没有早于前秦时代的弦乐器文物和碑文记载。

毫无疑问，谐律音程的发现远在音阶形成之前。因此，我们可说在用一组有序的单音字——宫、商、角、微、羽——来表示五声音阶中的五音之前，中国音律学家一定早巳掌握了某些谐和音率知识。当上下相生法发展、变为五声音阶推算时，他们必然具体地应用了谐率。他们用纯五度和八度的精确谐率，构造生律方法，还对宫、商、角、微、羽所指定的音程，推算出精确的比率。可是，李约瑟在讨论宫、商、角、徵、羽演变后，得出相反的结诊，

因而，我们可以得出结论，到公元前 4 世纪，无疑使用了五音的音阶，这个音阶中用宫、商、角、微、羽表明音的关系。然而，我们不能确切地说清这五个音的音程是什么，没有进

一步的信息可以告诉我们，同一材料同一张力下五根弦的相对长度，或者相同吹力下五支竹管的具体尺寸，在周代文献中找不到确切的信息。很明显，这两位学者遗漏了《管子·地员》五音音阶的音程计算。事实上，在他们研究中国古代声学的学术研究论著中，始终没有引用过这段文献。众所周知，正是这个幸而留传至今的文献，完整地记录了关于五音音程的精确信息。

由此可见，历史事实与李约瑟和鲁宾逊的说法恰恰相反，中国古代音律家精确定义了用宫、商、角、徵、羽所指定的音程。《管子》一书，是由稷下学派弟子们在公元前 4 世纪才编纂完成的。此书以管仲（卒于公元前 645 年）而取名，一是因为管仲是齐国开国重臣，事齐桓公为相，二是因为书中收录了许多管仲时代的材料。《管子》所载五声音阶推算法，相传已久。它出现于管仲时代，也许更早些。这个问题值得进一步深入研究。

在振动频率的定量观念出现之前，早期声学家利用振动体的长度来处理律的定量概念。那么，中国古代声学家是不是在张紧的弦上发现谐和音率，一直是科技史学家争论的问题。许多学者主张，中国声学家是用律管长度而不是用弦长度推导出谐率知识的。理由是，没布找到早于先秦时代的现存弦乐器文物和碑文记载。此外，有关音律或音程的讨论和记载所常常提及的，不是弦器而是律管。这个问题极为重要。我们现在知道，律管共振气柱的真实长度，比管子本身长度稍稍长一点，因为空气柱的波腹点位于管子开端之外的一小段距离中。因此用律管长度来确定谐和音率，会出现误差。

《诗经》和《尚书》等早期周代史料中，经常提到瑟、琴一类弦乐器。《论语》也常提到瑟和琴。直到 7978 年在曾侯乙墓中发现了乐器实物，我们才得以见到这两类公元前 5 世纪的弦乐器。墓中出土了 12 把二十五弦瑟，1 把十弦琴，还有 1 把五弦的调音仪器。这些弦乐器相当先进，必然经历过相当长的发展过程，调音仪器也许与韦昭说过的均钟木有关。由此可见，周代文献记载的弦乐器与考古发现完全一致。因而，可以排除误认为谐率知识出现在古代中国弦乐器形成之前的种种无端猜疑。关于律管或弦器的争论中，混杂着两个不同而相关的音乐声学论题，一个是谐和音率的测定，另一个是标准律的保存。要知道，古代中国文献资料提到律管时，常常与律的标准化和标准律的保存有关，与测量谐和音率无关。无疑，张紧的弦能方便、精确地测量谐率，古代中国也利用此法测量谐率。但在张紧的弦上，是无法保存标准律的，困难在于无法保持弦的张力长期不变，尤其是在古代，这是办不到的。显然，有必要使用某种不同于弦乐器的工具，完成标准化律和保存律的任务。古代中国音律学家用律管来达到这一目的。诚然，在完成标准化律和保存律的时候，律管兼有实践上和科学上的优点，结构合理，发音稳定。律管长度和 7L 径一旦确定，一般情况下，律音的偏移极其微小，几乎觉察不到。一套十三律律管，可以长期保存被称为十=律音阶的标准音阶。铸钟技术成熟后，青铜编钟经常采用这组十二律音阶。

李约瑟和鲁宾逊讨论古代的律时，宣称也许要到公元前 4 世纪初，受到巴比伦影响之后，精确律的概念在申国才得到重视。他们这个观点建立在不正确的巴比伦东传中国假说上，而

且与现存记录和考古发现相矛盾。应该注意到，单有谐和音率知识，还不足以在一组律营或一套编钟中编制具有适当谐率音程的十二律音阶。要推算出十二律中的适当音程，当然需要谐和音率知识，但古代中国声学家要解决的，是怎样在律管和编钟中编制出这些音程。这可不是个简单的任务。即使有相当高明的音程知识作指导，有特定的项目任务为目标，律管和编钟十二律的编制，也得经过一段十分漫长的发展过程，才能提炼出系统的经验编制法。尽管现存文献不多，但我们今天还是能欣赏到从公元前 13 世纪简单的商代钟和铙，到公元前 5 世纪精妙动听的曾侯乙编钟；这 800 年漫漫岁月中，编钟是怎样发展起来的。至于古代律管，因为用竹制作，容易腐烂，除了近年来发掘的几支战国律管残段，没有标本能流传至今，供我们考查和测量，后人不得不依赖文献资料来追溯律管的发展过程。

现代声学研究揭示，虽然律管中共振气柱的长度，由于管口效应，略长于律管本身，但是两者之差对小口径律管来说，仍然是相当的微小。因此，张紧弦所测得的比率，可作制造律管相对长度的一个相当好的初步参考，拟定各律管与标准基音律管的相对近似长度。然后，再凭经验针对各律管的特定音，作管长调整，以进一步提高精度。遗憾的是，现在找不到古代律管尺度的确切数据。现存最早十二獐管的精确长度记录，出现在公元前 90 年的《史记》中。把《史记》所记载的律管的长度和计算得到的长度加以比较，计算方法是，把《史记》所载音程比率与取作 8. I 寸的标准黄钟律管长度相乘，以得到计算长度。比较显示，律管所载长度与计算长度不同。

考核《史记》十二律音程的比率，明显可以看出，这些比率源于三分损益法黄钟列出律管的所载长度与用十二律比率算出的长度不同，这个事实明确无误地表明，古代律管制作家一定知道，律管长度不能简单地用对应音的弦长来确定。因此，倒们具有某些经验校正法。

不同于史记的记载，在我国先秦时期的《管子·地员篇》、《吕氏春秋·音律篇》还记载了另一种生律方法，也就是通常所谓的“ 三分损益法 ”的推导衍生半音音阶的过程。假设使用律管管长为律器的长度单位，则可如此理解三分损益法的具体过程：所谓三分损益，就是将律管长度平均三分，减去其一分为损，增加一分为益。（三分损一称为下生，三分益一为上生）通过三分损益，可以产生出黄钟之外的其他十一律。

具体步骤如下：

黄钟长九寸。

黄钟三分损一下生林钟。长六寸。

林钟三分益一上生太簇。长八寸。

太簇三分损一下生南吕。长五寸三分三厘三毫三丝三忽

南吕三分益一上生姑洗。长七寸一分一厘一毫一丝一忽

姑洗三分损一下生应钟。长四寸七分四厘零毫七丝四忽

应钟三分益一上生蕤宾。长六寸三分二厘零毫九丝八忽

蕤宾三分损一，倍之下生大吕。长八寸四分二厘七毫九忽八忽

（蕤宾三分损一的四寸二分一厘三毫九丝九忽，与黄钟不在同一均中〈西乐称为组〉之中，故倍之，以与黄钟同处一均）

大吕三分益一上生夷则。长五寸六分一厘八毫六丝五忽

夷则三分损一下生夹钟。长七寸四分九厘一毫五丝四忽

夹钟三分益一上生无射。长四寸九分九厘四毫三丝六忽

以此则十二律依长短次序排列如下：

黄钟，大吕，太簇，夹钟，姑洗，仲吕，蕤宾，林钟，夷则，南吕，无射，应钟。

上生六律：黄钟，太簇，姑洗，蕤宾，夷则，无射，称为六律，为阳。

下生六律：大吕，夹钟，仲吕，林钟，南吕，应钟，称为六吕，为阴。

三分损益法是古人根据物体发声的规律而制定出来的生律方法，是我国古代律学研究的伟大发明。这种方法与几千年后的今天，世界上采用光波波长作为长度基准，其基本理论有惊人的相似之处。三分损益律的首律是黄钟，如今人们通常以 C（c1）为首音，故有不少人将黄钟正律视作为 C。实际上我们无法证明古代的黄钟就是 C，但却可以把黄钟比拟作 C。在此基础上，将十二律依由长到短的次序，按顺时针环列一圈。相生之律皆间隔八律，所以三分损益又称为隔八相生法。它的基础在于标准器律管，而以四分之三为律比值，同样可以生律循环。

（3）通过律比值，得出在给定基音条件下计算频率的公式

李约瑟正确地注意到：中国人用纯五度导生十二律系统，但他们误认“五度相生”为“五度旋生”，把“五度旋生”中的“八度”，认为是“中国八度”。相关段落摘录如下：如此生出的“中国八度”和纯八度之间存在着明显的差别，纯八度的比是 1：2，而五度旋生“八度”的比是 262144：531441。因而，在纯八度和中国“八度”之间的比是 524288：531441。这称为最大音差，现在常常称为毕达哥拉斯音差，因为五度旋生被错误地与毕达哥拉斯的名字扯在一起。他的结论，并不是说在实践上古代中国人不知道纯八度，而是说中国在理论上推算出来的八度，不是纯八度。于是他们认为，不应该想象这种音列具有音阶功能，称这种音列为“中国半音音阶”是错误的。

正是这个原因，他们在自己的著作里称中国十二律为 gamut（音列）而不是 sdale（音阶）。然而，他们的结论是错误的，他们所谓的“中国八度”和对三分损益十二律功能的看法，来自他们对《吕氏春秋》所载三分损益法的误解，误认为中国的三分损益法就是西方的五度旋生法。确实，西方五度旋生法所导出的十二音阶含有最大音差，这也正是话方音律学界所面临的一个比较顽固的问题。约从 16 世纪到 18 世纪，欧洲音律学界主要的研究之一，就是如何处理最大音差，怎样把音差均分到八度之间的律音上。中国三分损益法虽然也利用五度生律，但同时也利用八度，建立上下（损益）相生原理，允许生律途径的选择，操纵导生律音的八度范围。由此，保证所得音阶的各个律音，最终定位到同一个八度内，成功地避

免了在三分损益十二律之中出现最大音差。

要想理解《吕氏春秋》所载三分损益法：必须弄明白的关键之处，就是黄钟律的导生，尽管《吕氏春秋》讲得清清楚楚，是由上生而得)，可是没有说是由仲吕律上生而得，对上生黄钟律的律，《吕氏春秋》不仅没有给出律名，而且也只字不提。这是因为生黄钟律不属于推算中的黄钟十二律。这就说明，高八度的黄钟律(c)，不可能由仲吕律下生而得，因为黄钟律(c)不是由仲吕律(F)上生而得，那么依照上下五度相生原理，高八度的黄钟律(c)也不可能由仲吕律下生而得。由此可得到结论，由仲吕律下生所得的律，不能用来推算黄钟十二律的八度。

正是在这一点上，李约瑟和鲁宾逊既错误地理解了三分损益法的生律过程，又错误地把他们所谓的“ 中国八度 ”硬插进中国的十二律系统。有关段落摘录如下：音列的律音共有十二个（第十三音，即八度，可以简单通过再进行一次计算而加入）。他们加入第十三音的过程，可以把从仲吕律(F)用下生所加入的十三音记作 c ’。因为 F 律和 F，律之间相隔一个最大音差，显然，所加三音(c')和黄钟律(c)之间的音程不是寻，而是黄钟音。其实古代记录根本就没有多算这一步，搞个什么十三音，也没有把十三音当作“ 八度 ”音。

李约瑟和鲁宾逊用五度旋生所推算出的十二音列，加上记作 c，的十三音，称作中国八度。右图，用上下五度相生法所推算出的八度，记作 c，姑且采用五度旋生的形式。虽然依照上下五度相生原理，高八度黄钟律不可能由仲吕律下生而得，因为黄钟律不是由仲吕律上生而得，但是高八度黄钟律(c)可由上生黄钟律(c)的 F ’律下生而得。如此得到的黄钟律（记作 c）确实比黄钟律(c)高八度。

如今，为了表明与五度的关系，三分损益法通常称为上下五度相生法，但是不能把五度相生中“ 相生 ”一词与五度旋生的“ 旋生 ”混为一谈，因为“ 相生 ”有八度范围的选择。在《吕氏春秋》记载中. 虽然只叙述了八度之内十二律音的导生，但是在这个生律途径上，每一步都可以选择由一个八度转移到另一个八度。为了揭示这个贯穿八度的结构，我们把两个相差八度的十二律画成五度旋生形式，通过上下相生原则的关系连接起来，连接关系用带箭头的虚线表示。所生高八度的律，采用五度旋生形式的两个相隔八度的《吕氏春秋》半音音阶，绕过最大音差分割相连的示意图。可以看出，从一个八度沿着虚线箭头就能转移向另一个八度，根本不需要经过最大音差分割。

以上的分析证明，在古代中国，纯八度不仅仅使用于实践，而且在理论上已经掺人到推导音阶的方法中。历史事实是，无论在《管子》还是在《吕氏春秋》的记载中，中国音阶从来没有出现什么最大音差。因此，李约瑟和鲁宾逊关于“ 中国八度 ”和中国十二律功能的两个结论，必须予以纠正。

澄清“ 中国八度 ”问题之后，我们转向纯四度问题。汉学家和科技史学家同样也认为，中国音阶中没有纯四度概念。李约瑟和鲁宾逊做过一个评述：可以看到，无论在结构的一般性方法上，还是在某些音的特定比上，比如八度和四度，毕达哥拉斯音阶和中国五度旋生的

十二音列并不等价。可见，中国十二音阶中“ 黄钟 ”律调四度的比率，确实不像希腊七声音阶的纯四度，它不是 3:4，而要比纯四度略高一点。

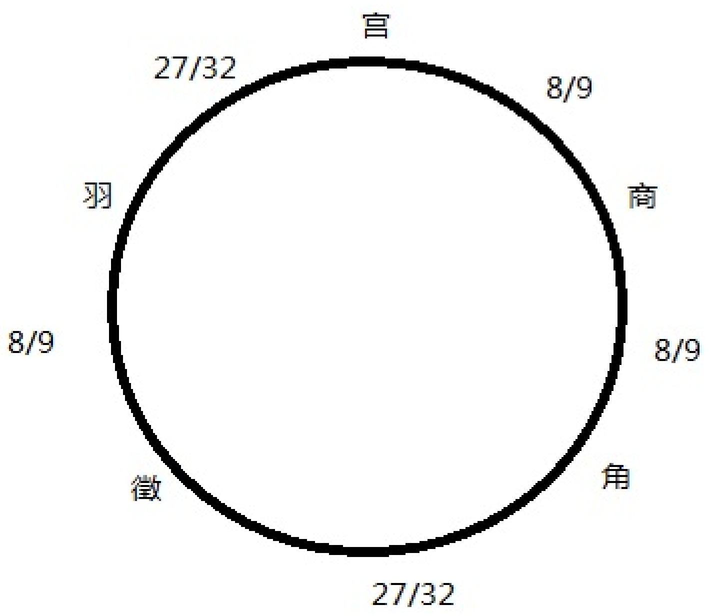
然而，上述区别只出现在以黄钟律作为基音的十二律音阶中。其他十一个律调中，四度的比率确确实实是 3:4。. 文献证明，中国古代很早就理解旋宫原理，确实用过十二律中的每个律作基音，因此所有十二个律调都很活跃。这也就是说，略升的四度只出现在十二律调中的一个律调之内，不能说成是中国音阶的一般特点。何况纯四度早就出现在现存最早的音阶推算记载中，《管子》所载微调五声音阶的推算中就有纯四度。

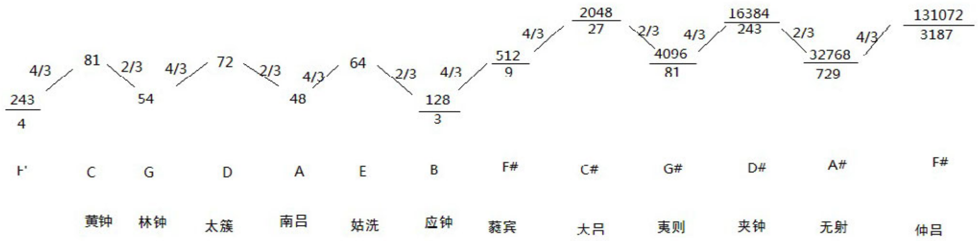
值得注意的是，李约瑟和鲁宾逊在此所说的中国音阶，是三分损益十二律而不是三分损益所导生的七声音阶；所说的毕达哥拉斯音阶，不是“ 五度旋生 ”的十二律音阶，而是古希腊爱奥利亚（Ionian，以 C ’为迄结音）调式的七声音阶。这个七声音阶可用升音序表示为：

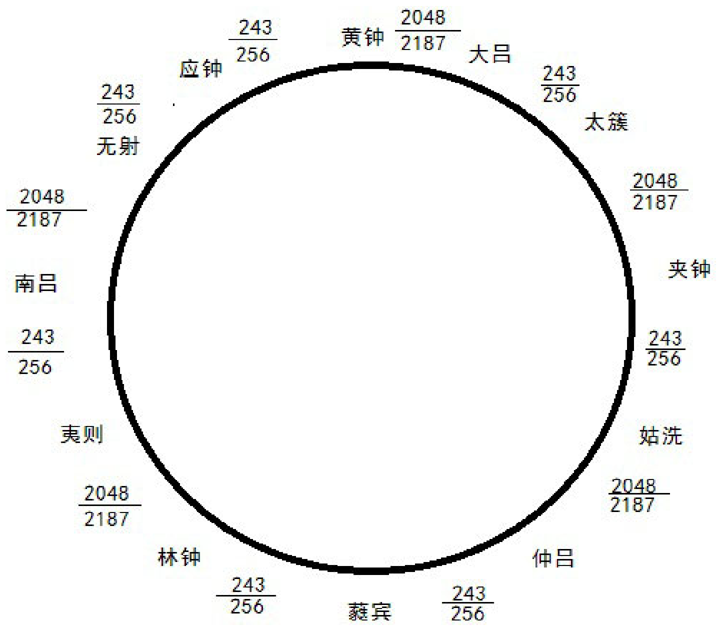
全音一全音—半音一全音一全音一全音一半音。

这个音阶就是现代所谓的完全音阶(diatonic scale)，具有“ 大 ”调式排列 36。然而要正确分析大调七声音阶与三分损益十二律音阶之间的关系，我们就应该比较十二律中七声音阶的结构。由所列十二律调，得出《吕氏春秋》三分损益音阶中内嵌的七声音阶，三分损益十二律调中有七个具有与完全音阶大调完全一样的七声音阶结构：“ 大吕一富 ”、“ 太簇一宫 ”、“ 姑洗一官 ”、“ 蕤宾一宫 ”、“ 林钟一官 ”、“ 南昌一宫 ” 和“ 应钟一宫 ”。

这就是说，中国兰分损益十二律音阶系统包含了毕达哥拉斯七声音阶。上面已提到过，文献证明十二个律调的早期实践，近来出土的乐器中，叉发现了实物证据。公元前 5 世纪的曾侯乙编钟和编磬等乐器实物的铭文，都表明当时的曾国及其邻国已普遍应用旋宫，铭文提到“ 黄钟一宫 ”、“ 太簇一宫 ”、“ 姑洗一宫 ”、“ 妥（蕤）宾一宫 ”两种不同的律比值，均可通过图表方式表现出他们的生律规律，将二者结合，考虑到大小半音的规律，将八度内各半音间律比关系，可以完全涵盖与下图三所示生律圆环之中，这样便详尽地反映了各律间的律比关系情况。


宫
8/9
商
8/9
角
27/32
徵
8/9
羽
27/32


243
4
4/3
81
2/3
54
4/3
72
2/3
48
4/3
64
2/3
128
3
4/3
512
9
4/3
2048
27
2/3
4096
81
4/3
16384
243
2/3
32768
729
4/3
131072
3187
C
G
D
A
E
B
F#
C#
G#
D#
A#
F#
黄钟
林钟
太簇
南吕
姑洗
应钟
蕤宾
大吕
夷则
夹钟
无射
仲吕



[3]

以上图三可知，七声音阶的频率比有两种：D 与 C、E 与 D、G 与 F、A 与 G、B 与 A 之间的频率比都是九分之八，这个比例即为全音之比值；F 与 E、C 与 B 之间的频率比都是二百五十六分之二百四十三（也即四分之三的四次方），这个比例即为半音之比值。通过循环计算，可以推导得出在给定基音条件下计算频率的简化公式，以数学方式表示如下：

logfn=logf0[nlog3-（n+a）log2]，（a 为 n 乘以[（log3-log2）/log2]的整数部分）。

[3] 《TWO-TONE SET-BELLS OF MARQUIS YI》，CHENG CHENG-YIH

第三章　三星堆成组玉石璧律比分析

1、三星堆遗址（真武仓包包）出土玉石璧及复原调音实验制作的成组石璧测量原始结果如下图

三星堆原璧与坯璧、复原璧的音乐声学对照表 [4]

制表：沈博　日期：2006 年 11 月

三星堆真武仓包包出土成組石璧								复原调音实验制作的成組石璧					坯璧复原璧
								坯璧	调音次数	复原璧调音结果			
调音序号	出土号	直径	厚度 (Cm)	频率 (Hz)	物理音高（pitch）	音乐音名	音强（dB）	频率 (Hz)		频率 (Hz)	物理音高（pitch）	音乐音名	音强（dB）
1	87GSZJ：13	20.30	1.1~1.3	3121.82	G7-16	g4-16	12.03	3279.43	4	3117.	G7-4	g4-4	25.05
2	87GSZJ ：37	19.80	0.8~1.3	3987.27	B7+7	b4+7	27.43	3304.27	4	3593	B7+6	b4+6	27.98
3	87GSZJ：1	19.30	1.0~2.0	3978.20	B7+15	b4+15	25.17	4177.85	2	3958.	B7-3	b4-3	37.73
4	87GSZJ：2	18.4	1~1.4	3415.20	#G7+39	#g4+39	23.12	3826.57	4	3359.	#G7+11	#g4+11	28.07
5	87GSZJ：3	17.1	0.8~1.2	1098.12	#C6-25	#c3-25	18.20	3912.71	4	3912.	B7-25	B4-25	19.13
6	87GSZJ：4	14.2	0.9~1.2	3536.10	A7+0	a4+0	18.70	3886.10	3	3516.	A7-9	a4-9	29.72
7	87GSZJ：5	13.6~14.1	0.9~1.2	2679.98	E7+20	e4+20	27.85	2329.36	6	2686.	E+24	e4+24	35.98
8	87GSZJ：18	13.2	0.9~1.2	2257.12	#C7+22	#c4+22	18.80	2522.81	3	2218.	#C7-6	#c4-6	34.59
9	87GSZJ：19	11.6	0.8~1.0	2506.57	#D7+4	#d4+4	18.46	3102.75	8	2503.	#D7+2	#d4+2	32.19
10	87GSZJ：20	9.8	0.5~0.9	2575.50	E7-49	e4-49	21.11	3359.78	3	2632.	E7-11	e4-11	38.04
11	87GSZJ：22	7.1	0.6~0.7	4356.47	#C8-39	#c5-39	36.65	6339.21	7	4339.	#C8-46	#c5-46	33.11

2、以大小半音法结合三分损益法计算成组玉石璧的音乐测量结果之律比关系

按考古学计算方法，C0 也就是音乐学上的 C2（大字二组）的频率 16.3515978313Hz，取约值 16.35Hz；此频率的对数便是 1.21356019708。因为一个八度为 1200 音分，其频率比为 2，又比例常数、即 n = 1200/lg2 = 3986.31371386，如果我们要求出 87GSZJ：13 件石璧实测频率下的理论音分值，可通过以下计算求得：

先求出 87GSZJ：13 件石璧 3121.82Hz 的对数与 16.35Hz 的对数之差。lg3121.82－lg16.35 = 3.49440789－1.213560197 = 2.2808477，将 2.2808477*3986.31371386 = 9092.175。即 9092.175 音分。

---

[4] 参见幸晓峰等《三星堆出土成组石璧的复原调音实验研究》，《音乐探索》2012 年第 3 期。

同理可知，通过实测音分可求得 87GSZJ：13 件石璧的理论频率值：87GSZJ：13 件石璧物理音高为 G7-16, C0 至 C7 为 8400 音分, C7 至 G7 为 700 音分, 则实测音分为 9084 音分。9084/3986.314+1.21356 = 3.498, 然后计算反对数, 计为 10 的 3.498 次幂, 得 3104.560（Hz）。这 3104.560Hz 就是 9084 音分的频率。

全部计算结果如下表：

三星堆成组玉石璧理论与实测音分比较以及假定基音理论值分析

调音序号	出土号	频率 (Hz)	物理音高（pitch）	音乐音名	实测音分（cent）	由实测频率求得理论音分（cent）	理论与实测音分误差（cent）	以 87GSZJ：4 号玉璧为基音理论音分（cent）	以实测音分求得理论频率 (Hz)	坯璧频率 (Hz)	复原璧频率 (Hz)	物理音高（pitch）	音乐音名
1	87GSZJ：13	3121.82	G7-16	g4-16	9084	9092.175	8.175	9100	3104.560	3279.43	3117.	G7-4	g4-4
2	87GSZJ ：37	3987.27	B7+7	b4+7	9507	9515.792	8.792	9500	3962.780	3304.27	3593	B7+6	b4+6
3	87GSZJ：1	3978.20	B7+15	b4+15	9515	9511.849	3.151	9500	3981.072	4177.85	3958.	B7-3	b4-3
4	87GSZJ：2	3415.20	#G7+39	#g4+39	9239	9247.674	8.674	9200	3396.252	3826.57	3359.	#G7+11	#g4+11
5	87GSZJ：3	1098.12	#C6-25	#c3-25	7275	7283.353	8.353	7300	1093.956	3912.71	3912.	B7-25	B4-25
6	87GSZJ：4	3536.10	A7+0	a4+0	9300	9307.901	7.901	9300	3523.709	3886.10	3516.	A7-9	a4-9
7	87GSZJ：5	2679.98	E7+20	e4+20	8820	8827.977	7.977	8800	2666.859	2329.36	2686.	E+24	e4+24
8	87GSZJ：18	2257.12	#C7+22	#c4+22	8522	8530.690	8.690	8500	2243.882	2522.81	2218.	#C7-6	#c4-6
9	87GSZJ：19	2506.57	#D7+4	#d4+4	8704	8712.168	8.168	8700	2494.595	3102.75	2503.	#D7+2	#d4+2
10	87GSZJ：20	2575.50	E7-49	e4-49	8751	8759.133	8.133	8800	2563.303	3359.78	2632.	E7-11	e4-11
11	87GSZJ：22	4356.47	#C8-39	#c5-39	9661	9669.102	8.102	9700	4335.109	6339.21	4339.	#C8-46	#c5-46

由上表计算结果可以看出：

（1）全部玉石璧理论与实测音分误差均在绝对值 8 音分间。

根据现代声学测量研究, 相差十音分内, 人耳也能察觉, 但无法说出具体相差多少音分, 差值在八音分之间，可见差值之小，这种比例关系的符合，是极为精确的。由此可见，此组玉璧确为符合以九分之八为律比值的生律规律，各音之间存在一定的律比关系。这种律比关系，是存在先验的理论预设情况下，经过设计而成的，并以计算结果为基础，按照一定音高概念制作出了该组玉石璧。检验方法如下，例如：

任取出 87GSZJ：1 件石璧 3978.20Hz 的对数与 16.35Hz 的对数之差。lg3121.82－lg16.35 = 3.5996866－1.213560197 = 2.386126 将 2.2808477*3986.31371386 =9511.849。即 9511.849 音分。

同理可知，通过实测音分可求得 87GSZJ：1 件石璧的理论频率值：87GSZJ：1 件石璧物理音高为 B7+15，C0 至 C7 为 8400 音分，C7 至 B7 为 1100 音分，则实测音分为 9515 音分。该件璧器理论音分与实际音分差值为 9511.849－9515=3.151 音分

任取一件璧器进行计算，结果都在此范围之内，且全部玉石璧理论与实测音分误差均在

绝对值 8 音分间，即使是最大差值也仅为 8.792，这就充分说明该组玉璧是具有设计性的符合律比关系的一组具有极强音乐性能的璧器。

（2）全部玉石璧在任取 87GSZJ：4 件石璧，假定其为给定基音情况下，理论与实测音分误差同样均在绝对值 10 音分间

检验方法如下，例如：

任取 87GSZJ：4 件石璧，假定其为给定基音，通测剩余 10 件石璧之理论音分，与实测音分相比较，误差值也同样在绝对值 10 音分内。

任取出 87GSZJ：3 件石璧 1098.12Hz 的对数与 16.35Hz 的对数之差。lg1098.12－lg16.35 = 3.046498－1.213560197 = 1.8270896。将 2.2808477*3986.31371386 =7283.353。即 7283.353 音分。

同理可知，通过实测音分可求得 87GSZJ：3 件石璧的理论频率值：87GSZJ：3 件石璧物理音高为#C6-25，C0 至#C6 为 7300 音分，则实测音分为 7275 音分。该件璧器理论音分与实际音分差值为 7283.353－7275=8.353 音分

由此可知，该组玉璧可以任选基音，通过律比关系计算，得出剩余全部璧器的理论音分，而这些理论音分同实际测试结果所显示的璧器音分值基本吻合（理论值与实际值的绝对值差均在 10 音分以内）。这也就充分说明，成组玉璧的是具有调校音列的功能的，这个功能，就极有可能证明成组玉石璧不仅仅是具有极强的音乐性能，符合律比关系的打击乐器，而且除此以外，该组玉石璧同样具有调校音列的功能，如果不是巧合，那么它很可能就具有承担标准律器的功能。而这种调校方法，不是我国先秦时期的《管子·地员篇》以及《吕氏春秋·音律篇》所记载的“三分损益法”，而是《史记》中记载的符合现代声学原理的以九分之八为比值计算大小半音律比关系的调校方法。

（3）模拟推算仿制成组玉石璧理论上的音乐测量值结果与实测结果同样符合

全部仿制石璧按音列排列，音名如下：

C6 **#C6** D6 E6 F6 G6 A6 B6 C7 **#C7** D7 **#D7** **E7** #E7 F7 #F7 **G7** **#G7** **A7** #A7 **B7** #B7 C8 **#C8**（其中黑色部分为按照同一调式排列，成组玉石璧所缺之音名）

将原十二律 C G D A E B F# C# G# D# A# F 依顺序排列，可得：

C #C D #D E #E F #F G #G A #A B #B

将成组仿制石璧各音名与十二律各音名之间进行比较计算，其各律间的比例关系为：81、2048/27、72、16384/243、64、无、131072/2187、572/9、54、4096/81、48、32768/729、

128/3

检验方法如下，例如：

任取 87GSZJ：4 件石璧与 87GSZ J：5 件石璧，以其实测音分所得之理论频率相比较，则有 A7/E7=2666.859/3523.709=0.756833=48/64=3/4+0.007，这是大半音。

任 取 87GSZ J ： 18 件 石 璧 与 87GSZ J ： 19 件 石 璧 相 比 较 ， 则 有 #C7/#D7=2243.882/2494.595=0.8994975=（2048/27）/（16384/243）=8/9+0.011，这是小半音。[5]

任意两件璧器，两两相推演，均在相生比率之间。由此可见，即使是仿制成组石璧，在律比关系上也符合九分之八为比值的大小半音生律规律。也就是说，成组玉石璧在设计之初，就已经预先设定了其具有调校音列的功能，这种功能是经过人为策划的，通过复制可以验证的，不仅仅是理论上可证明，也是在实践中可以检验的。因而，成组玉石璧具有承担标准律器的功能，不是偶然的巧合，而是确定无疑的设计，只有这样，才可以解释以上三种方法均得出的符合的结果。

[5] 《SCIENCE AND TECHNOLOGY IN CHINESE CIVILIZATION》，CHENG-YIH CHEN

第四章 结 论

综合上表中计算结果以及以上 3 点分析可以看出：成组玉石璧具有设计性的音乐性能，符合一定的律比关系，并且这种符合不是偶然的巧合，而是存在人为的设计。基于这三点可以证明，本组石璧应该是一组人为刻意打磨而成，可以作为标准律器的模范样本。

同样，在以相同方法研究陕西省商州市东龙山遗址第 78 号墓葬出土石璧以及其他遗址出土石璧时，本文所用的求证方法同样适用，亦可得出相同结论。（见附表 1、2）由此可见，通过测量结果及此种方法之演算可以证明：每一组音乐声学测量构成音阶关系的玉石璧，均具有承当标准律器的功能。

参考文献

古籍类：

【1】司马迁：《史记》[M]，中华书局，1959年。

【2】班固：《汉书》[M]，中华书局，2007年。

【3】《吕氏春秋》[M]，上海古籍出版社，1978年。

【4】《管子》[M]，中华书局，2007年。

【5】范晔：《后汉书》，上海古籍出版社，1987年.

【6】朱载堉：《乐律全书》，商务印书馆，1978年。

【7】《大戴礼记》，上海古籍出版社，1987年.

【8】《尚书》，上海古籍出版社，1987年.

【9】《诗经》，吉林文史出版社，2007年.

【10】《周髀算经》，文物出版社，1980年.

【11】《春秋繁露》，中华书局，2011年.

【12】《数书九章》，商务印书馆，1937年.

考古报告类：

【1】《良渚遗址群考古报告》，文物出版社，2005年。

【2】《四川考古报告集》，文物出版社，1998年。

【3】《<三星堆祭祀坑>简介》，文物出版社，1999年。

专著类：

【1】杨荫浏：《中国古代音乐史稿（上、下)》[M]．人民音乐出版社,2004年。

【2】杨荫浏：《中国音乐史纲》[M] .上海万叶书店，1952 年

【3】缪天瑞:《律学》(第三次修订版）[M].人民音乐出版社，2004 年。

【4】王光祈：《东方民族之音乐》[M] .成都出版社,1981年。

【5】田边尚雄：《中国音乐史》[M] .台北商务印书馆，1997年。

【6】戴念祖：《朱载堉—明代的科学和艺术巨星》[M].人民出版社，1990 年。

【7】冯光生，谭维四：《曾侯乙编钟的发现与研究》[M] .湖北人民出版社，1992.

【8】黄翔鹏：《均钟考》[M].湖北人民出版社,1992年。

【9】贾陇生等：《用激光全息技术研究曾侯乙编钟的振动模式》，江汉考古出版社，1981 年。

【10】李纯一：《中国古代音乐史稿》，人民音乐出版社，1981年。

【11】刘钝：《大哉言数》，辽宁教育出版社，1995 年。

【12】闻人军：《<考工记>成书年代新考》，中华书局，1984年。

【13】刘复：《十二律的发明者朱载堉》，“国立中央研究院”历史语言研究所集刊外编第一种，

1933 年。
【14】李兆华:《中国数学史》，台北文津出版社，1995 年。
【15】丘光明:《中国物理学史大系——计量史》，湖南教育出版社，2005 年。
【16】丘光明:《中国古代度量衡》，中国国际广播出版社，2011 年。
【17】程贞一:《黄钟大吕——中国古代和十六世纪声学成就》[M]. 上海科技教育出版社，2007 年。
【18】黄兴宗:《李约瑟中国科学技术史》，科学出版社，2008 年。

主要期刊：

【1】陈应时.《管子》《吕氏春秋》的生律方法及其它[J].武汉音乐学院学报，2000 年 3 期.
【2】李成渝.《管子》《吕氏春秋》生律法之异同[J]. 武汉音乐学院学报，1999 年 4 期.
【3】刘操南.《史记-律书-历书考释》[J].古籍整理研究学刊，1996，(1).
【4】袁芥芳.《史记-律书》算解[J].历史研究，1990，(1).
【5】应有勤，孙克仁. 比三分损益率更早的律制[J].音乐艺术，1990，(4).
【6】曾华青. 蔡元定《律吕新书》之解读[J]艺术研究，1992，4.
【7】郭树群. 对《比三分损益率更早的律制》的质疑[N].音乐艺术，1990，(10).
【8】戴振铎. 广义三分损益率与朱载堉十二平均律及纯律的关系[J].中国音乐学（季刊)，2000，(4).
【9】唐继凯. 简论:“同律度量衡”[J].西安音乐学院学报，2001，(9).
【10】张柏铭. 论汉代黄钟标准[N]. 西安音乐学院学报，2002，(9)
【11】陈其翔，陆志华. 乐音谐和指数的计算[J].中国音乐学（季刊)，1994，(1).
【12】陈应时. 律学四题[J]. 音乐艺术，1982，(1).
【13】李方元. 三分损益率的实践历程及理论规范——兼及古代乐律研究中的认识问题[J].武汉音乐学院学报，1990，(2).
【14】陈正生. 三分损益率的算式[J].中央音乐学院学报，1993，(2).
【15】陈其射.试论简单整数等差律——浅析三分损益律学思维前兆[J].贵州社会科学，2001，(4).
【16】孔培培.杨荫浏著《中国音乐史纲》和《中国古代音乐史纲》比较研究[J].中国音乐学（季刊)，2003，(3).
【17】关晓武.也论《史记-律书中的律数》[J].内蒙古师范大学学报，2007，(11）.
【18】陈其翔，陆志华.用分数逼近法研究三分损益律[J].音乐艺术，1988，(3）.
【19】李爱珍，刘振.用数学的观点论述研究律学的三种途径[A].学术论坛，1996，5.
【20】丘光明.中国古代度量衡标准[J].考古与文物，2002，(3）.
【21】陈其翔，陆志华.中国古代乐律理论的重现[J].中央音乐学院学报(季刊)，1997，(4）.
【22】陈其翔，陆志华. 中国古代乐律系统的形成和发展[J]. 音乐艺术，1996，(9).

【23】黄翔鹏. 中国古代律学——一种具有民族文化特点的科学遗产[J]. 律学研究资料，1990.
【24】朱恩宽，李武华，冯德民.中国古代数理音律的发展[J]. 陕西师大学报，1995，(6）.
【25】唐继凯.中国古代历法与律吕之学——中国传统律吕之学及律历和一学说初探[J]. 西安音乐学院学报，2000，(9).
【26】陈应时.中国古代文献记载中的“律学”[J]. 音乐艺术，1986，(3).
【27】刘道远.周易乐律[J]. 中国音乐学（季刊)，1991，(4).
外文资料：
【1】 Apel,Willi, The Harvard Dictionary of Music.Boston: Harvard University Press,1944.
【2】Apel,Willi, and Daniel, Ralph T. The Harvard Brief Dictionary of Music.New York : Pocket Books,1961.
【3】Needham Joseph. Science and Civilisation in China. Vol.1. Cambridge: Cambridge University Press,1954.
【4】Needham Joseph. Science and Civilisation in China. Vol.4. Cambridge: Cambridge University Press,1962.
【5】Chen Cheng-Yih. Science and Technology in Chinese Cicilization. Singapore: World Scientific,1987.

附表（1、2)：

1.陕西省商州市东龙山遗址第 78 号墓葬出土石璧音乐声学测量统计表

测音编号	器物名称	出土号	形制数据 （厘米）				测音数据			
			直径	孔径	肉宽	厚	频率（HZ）	物理音高	音名	音强（dB）
1	石璧	M78：1	17.0	3.0	6.0～7.5	0.8～2.2	3884.78	B7-38	b4	25.38
2	石璧	M78：4	13.0～16	5.0	4.0～7.0	0.7～1.5	3507.90	A7-14	a4	30.25
3	石璧	M78：8	13.0～16.0	5.0	3.0～6.0	0.8～1.5	3038.41	#F7+37	#f4	31.74
4	石璧	M78：2	15.5	5.5	6.0～7.5	4.0～5.0	4094.67	C8-47	c5	29.16
5	石璧	M78：7	11.0～13.5	5.0	3.0～4.0	1.2～2.6	4651.58	D8-26	d5	15.18
6	石璧	M78：9	12.0～14.0	4.0	4.0～4.5	0.7～2.0	4905.74	#D8-34	#d5	30.35
7	石璧	M78：3	10.0～15.0	4.0	4.0～5.0	0.7～1.8	5336.79	E8+12	e5	33.97
8	石璧	M78：5	8.5～12	5.0	4.9～5.5	1.0～3.0	5625.02	F8+3	f5	23.60
9	石璧	M78：6	10.0～11.5	3.0	3.5～4.0	0.8～1.6	5343.95	#F8-25	#f5	26.07

2.陕西省商州市东龙山遗址第 78 号墓葬出土石璧理论与实测音分比较以及假定基音理论值分析

调音序号	出土号	频率 (Hz)	物理音高（pitch）	音乐音名	实测音分（cent）	由实测频率求得理论音分（cent）	理论与实测音分误差（cent）	以实测音分求得理论频率(Hz)
1	M78：1	3884.78	B7-38	b4	9084	9092.175	7.123	3870.65
2	M78：4	3507.90	A7-14	a4	9507	9515.792	8.321	3491.30
3	M78：8	3038.41	#F7+37	#f4	9515	9511.849	8.151	3085.31
4	M78：2	4094.67	C8-47	c5	9239	9247.674	8.324	4084.43
5	M78：7	4651.58	D8-26	d5	7275	7283.353	8.456	4622.34
6	M78：9	4905.74	#D8-34	#d5	9300	9307.901	7.675	4893.23
7	M78：3	5336.79	E8+12	e5	8820	8827.977	7.321	5315.12
8	M78：5	5625.02	F8+3	f5	8522	8530.690	8.321	5637.91
9	M78：6	5343.95	#F8-25	#f5	8704	8712.168	8.234	5327.04

致 谢

中华文明是一个古老而悠久的文明，对于中华古代文明的研究意义深远。中国文明传承至今，五千余年从未间断的深厚文化积淀具有独特的魅力。我的导师幸晓峰研究员曾撰文深刻论述中华历史的最显著特征——积淀性。在这些研究成果中，最具有宏观性的，莫过于礼乐的研究。三千多年的音乐声学研究，源远流长，在浩如烟海的文献史料中，有关乐律方面的典籍更是汗牛充栋。其中的重要成果——“同律度量衡”学说便产生于我国上古时期，它是我国辉煌的古代文明的标志，是我国乐律研究的重要成果，同时也是人类文明史的精华。本文在此基础上进行一定程度的探讨，其理论基础就是建立在幸晓峰研究员对于中国古代礼乐文明研究的成果之上。没有这个成果，本文的探讨将无从谈起。在此我对我的导师表示深深的感激和最诚恳谢意！

在绵亘数千年前的历史发展长河中，“同律度量衡”学说从最初的创立、不断发展完善、长期实践修正到最终自成一格，其深刻的文化研究价值、历史研究内涵及科技研究方法，都是我们后辈学人在日新月异的文明发展路途中需要不断认识和深入发掘的，这是因为关于“同律度量衡”学说的更进一步研究，不仅仅具有其单纯乐律方面的价值，更在于关于此学说的研究，对与我们今天重新了解和认识古代乐律学、古代天文学、古代计量学、古代算学等诸多领域具有不可忽视的重要作用，对于我们研究中华礼乐文明的发展具有不可估量的重要意义，正是基于这个原因，在科学技术突飞猛进的今天，结合当前最新的考古发掘和研究成果，同时采取现代化的声学研究方法和技术手段重新审视此一学说，深入挖掘其在乐律、天文、计量、算学等各领域的内涵，对于中华文明的传承发展具有相当重要的意义。研究这些意义，需要相当多的领域的交叉应用。在研究过程中，我得到了师兄沈博以及同学魏楚楚的大力协助，解决了研究当中许多技术难题。在此一并表示感谢！

个人简历

胡岩　　男　　　年龄：27 岁　　　民族：汉　　　政治面貌：中共党员

教育背景

9/2004 – 6/2008 中国人民大学 法学院 北京 法学学士 (法学专业)
9/2010 – 6/2013 四川省社会科学院 历史所 成都 历史学硕士 (专门史专业)

《非物质文化遗产传承初探》发表于国家级核心期刊《社会科学研究》

参与四川社科院与成都博物院金沙博物馆共同课题《金沙出土石磬、铜铃、玉石璧音乐声学性能及考古学综合研究》，独立撰写研究报告中关于声学测量部分，或四川省科技厅验收通过。